

APROVEITAMENTO DO LODO RESIDUAL DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE E PAPEL EM TIJOLOS DE TERRA-CRUA

Rosane Ap. Gomes Battistelle e Obede Borges Faria*

UNESP – Depto. de Engenharia Civil, Bauru, SP, Brasil.

e-mail: rosane@feb.unesp.br

UNESP – Depto. de Engenharia Civil, Bauru, SP, Brasil.

e-mail: obede@feb.unesp.br

Tema 5: Comportamento e resistência dos edifícios

Palavras-Chave: Adobe, celulose e papel, materiais de construção

Resumo

Este projeto visa uma aproximação entre novos materiais para a construção civil com o emprego de resíduos industriais oriundos da fabricação de celulose e papel, buscando uma solução sustentável. A utilização de produtos fabricados com resíduos industriais acoplando fibras vegetais em sua composição, tem demonstrado ser um caminho viável do ponto de vista tecnológico, pois reduz a produção de rejeitos, apresentando materiais diferenciados e menos onerosos. Por outro lado, as técnicas de construções em terra-crua têm evidenciado sua versatilidade mundialmente, em qualquer de suas modalidades, como um material de excelentes qualidades térmicas e acústicas, e com um consumo praticamente nulo de energia para sua produção. Dentro deste enfoque, e considerando os impactos gerados pelas fábricas de papel e celulose, estudos que visam demonstrar o potencial de utilização do lodo residual gerado durante a produção de papel na indústria Votorantim Celulose e Papel (VCP) de Jacareí/SP/Brasil, têm sido desenvolvidos, por meio de uma parceria entre a indústria e a universidade UNESP/Bauru. Após análises químicas e toxicológicas do lodo residual, obteve-se uma composição de 58,9% de fibras, sendo classificado como Classe II, segundo a NBR 10.004/87. Para avaliar o seu potencial de uso em materiais de construção, foram confeccionados tijolos de adobe, com o solo arenoso do município de Bauru/SP, nos traços 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 40% em volume de resíduo. Foram realizados diversos ensaios para caracterização dos tijolos, tais como: retração, absorção de água e resistência à compressão simples, intemperismo, gotejamento, ação do fogo, bem como, análise térmica e acústica. Os resultados demonstraram a viabilidade no emprego do resíduo, nos tijolos de terra-crua conferindo aos mesmos bons níveis de resistência, manuseio, leveza e durabilidade, sendo escolhido como traço ideal, o de 20% de resíduo na sua composição.

1. Introdução

A problemática dos resíduos sólidos industriais gerados acentuou-se rapidamente em função do aumento do número e variedade de produtos oferecidos no mercado nacional e internacional, principalmente os que usam embalagens descartáveis, associando assim, o aumento da quantidade de resíduos gerados para cada novo produto lançado. Esse aumento descontrolado de resíduos causa problemas que se caracterizam pela escassez de área de deposição de resíduos (advindos da ocupação e valorização das áreas urbanas), problemas de saneamento público com a contaminação ambiental e, em relação às indústrias, os altos custos sociais gastos no gerenciamento do seu resíduo.

Uma das maneiras de solucionar a questão dos rejeitos industriais envolve a utilização desses como matérias primas que possam ser comercializadas e, portanto, o aproveitamento de resíduos industriais tem sido apontado como uma alternativa econômica, social e ambiental adequada, por meio da redução dos custos dos materiais, criação de uma nova categoria de sub-produto, geração de novos empregos e, principalmente, minimização dos impactos ambientais e os gastos energéticos.

Quanto ao consumo energético gasto por algumas indústrias, MARIOTONI & SOARES (1998) fizeram um levantamento desse custeio e compararam a economia de energia no processo de fabricação de vários materiais, quando utilizando produtos novos e reciclados. Como exemplo, citam as fibras de celulose que são modelos típicos desses impactos negativos, pois despendem um grande consumo energético com o seu cozimento, branqueamento e refinamento, além do grande consumo de água utilizado no processo de produção. A primeira solução para esse resíduo industrial, geralmente, advém da indústria que tenta fechar o seu ciclo produtivo de tal forma a minimizar a saída de rejeitos e a entrada de matéria prima não renovável. No entanto, mesmo em menores porcentagens, o resíduo é gerado, e a solução trivial adotada pelos fabricantes de celulose e papel restringe-se à disposição final em aterros sanitários e, em alguns casos, a sua utilização na agricultura, como substrato para o cultivo de novas mudas de árvores, consumindo um volume mínimo de material.

Uma das soluções que merece destaque é o emprego do rejeito industrial na construção civil pois, segundo CINCOTTO (1988), o setor da construção consome, em média, 75% dos recursos naturais, sendo necessário reduzir o custo da construção e a quantidade de matéria-prima consumida. Assim sendo, ao invés de enviá-lo para os aterros, este resíduo poderia ser acoplado a novos materiais, que é o objetivo primordial dessa pesquisa.

A escolha do material, foi direcionada ao emprego de uma das técnicas tradicionais de terra-crua (SILVA, 2001), justamente pelas preocupações ecológicas e sociais da atualidade, uma vez que se almejava o posterior emprego dos tijolos de adobe com celulose e papel em auto-construções, tentando assim, minimizar ao máximo os gastos energéticos oriundos da aquisição das matérias primas (na fase de fabricação do produto), como também, no seu posterior emprego (sistema de mutirões).

Do ponto de vista do consumo de energia, HOUBEN (1997) e PORTÁ-GÁNDARA et al. (2001) apresentam dados significativos da economia de energia que as habitações em terra propiciam, porém mencionam que esta técnica demanda mais tempo para sua fabricação, quando realizado sem equipamentos automatizados. Ainda dentro das perspectivas atuais do emprego de materiais que consomem menos energia, McHENRY (2000) cita como vantagem do material “terra”, a menor demanda de energia devido a facilidade de encontrá-la (material do próprio local) e, quando necessário, sua reciclagem é direta, pois o resíduo gerado nos canteiros de obras é praticamente nulo, sendo que, os tijolos de adobe não apreciados podem ser desfeitos e moldados novamente.

Na fabricação dos adobes desse trabalho utilizou-se, o solo arenoso da cidade de Bauru/SP, sendo conhecido cientificamente como “solo colapsível”, com proporções aproximadas de 85% de areia e 15% de argila, ideais para o emprego dessa técnica.

Desta forma, esta pesquisa teve como meta principal analisar a possibilidade do uso do resíduo da indústria de celulose e papel em tijolos de adobe, bem como definir o ‘traço-ótimo’ baseando-se nas características físicas e mecânicas do material, como também nos indicativos referentes ao desempenho térmico e acústico do material.

2. Experimentação e resultados

Para a caracterização física e mecânica dos tijolos de adobe foram realizados onze ensaios laboratoriais (retração, umidade de equilíbrio ao ar, absorção de água, resistência a compressão simples, gotejamento, intemperismo, inflamabilidade e incombustibilidade do material, perda de massa, condutividade térmica e acústica). Os tijolos foram constituídos por solo e resíduo industrial de celulose e papel, fabricados nos traços de 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 40% em volume de resíduo, sendo fabricados 20 amostras para cada traço. Toda essa pesquisa fez parte do trabalho de

doutoramento de BATTISTELLE (2000) e, neste trabalho será enfocado três experimentos, ou seja: condutividade térmica e acústica e o ensaio de intemperismo.

2.1. Ensaio de condutividade térmica

Para a obtenção da condutividade térmica dos tijolos de adobe foi usado a 'técnica de fio quente e paralelo'. Para a aplicação desta técnica seguiu-se a metodologia apresentada no trabalho de SANTOS & CINTRA FILHO (1986), sendo preparados os corpos-de-prova com os próprios tijolos de adobe. Para cada traço foram testados dois corpos-de-prova, onde os tijolos foram medidos, pesados e calculados suas respectivas densidades. Em um dos tijolos (base) foram realizadas duas ranhuras, bem finas, paralelas e distanciadas de 16 mm uma da outra. Na marca central foi colocado o termopar e na outra ranhura passou o fio quente. Os fios foram bem esticados e presos nas laterais, em presilhas fixadas num suporte de madeira. Sob o tijolo pronto foi colocado o outro e sob os dois foram inseridos pesos, de forma a manter as duas superfícies bem unidas (Figuras 01 e 02). Em uma segunda etapa ligou-se o corpo-de-prova montado (sanduíches de tijolos), em uma fonte de tensão contínua, a um circuito de aquecimento e a um micro computador que descarrega os dados de temperatura e condutividade térmica ao longo do ensaio.

A Tabela 01 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de condutividade térmica.

Tabela 01- Resumo dos dados obtidos no Ensaio de Condutividade Térmica

Traços	Densidade da Amostra (g/cm³)	Condutividade Térmica (W/m²°K)
0 %	1840	1,32
10 %	1740	1,07
15 %	1710	1,02
20 %	1600	0,92
25 %	1610	0,79
30 %	1510	0,77
40 %	1370	0,61

Em relação aos resultados obtidos verifica-se na Tabela 01, nas colunas 01 e 03, que o aumento de resíduo é inversamente proporcional aos valores de condutividade. Com a introdução do resíduo e, conseqüentemente, de vazios (celulose e ar no interior da mistura), esperava-se que os valores de condutividade térmica decrescessem e isto realmente ocorreu, pois os valores de condutividade começaram com 1,32 W/m²°K para o traço 0% e chegaram a 0,61 W/m²°K para o traço 40%. Assim, com a incorporação do resíduo aumenta mais o desempenho do material em relação a condutividade, quanto maior a porcentagem de resíduo maior é o seu ganho.

Segundo a teoria das propriedades térmicas dos materiais, o coeficiente de condutividade térmica significa a maior ou menor facilidade que um material possui em conduzir calor. Em regiões de clima quente (tropical), existe a necessidade de utilização de materiais de construção com um bom isolamento térmico, isto é, um mal condutor de calor (baixos valores de condutividade térmica), como por exemplo o isopor, madeira, lã e também, paredes duplas com bolsões de ar no meio, sendo que o aumento de ar contido no material acarreta uma diminuição da condutividade. Estes tipos de materiais retardam a transferência de calor do lado exterior para o interior da edificação. As construções em terra crua (como o adobe), citadas várias vezes na bibliografia, são conhecidas como ambientes de ótimo isolamento térmico, isto é, elas recebem o calor externo, absorvem bem, segurando-o e, depois de um período de tempo, expõe ao ambiente interno. No caso de países com climas predominantemente quentes, como o

Brasil e, se esta pesquisa restringisse apenas na escolha do melhor traço em relação a esse ensaio, o traço 40% seria o escolhido, com menor valor de condutividade térmica.

2.2. Ensaio de condutividade acústica

Para a obtenção das características acústicas dos diversos tijolos foram elaboradas caixas fechadas com os próprios tijolos (Figura 03), usando internamente uma companhia tipo cigarra, com uma potência de 5,0 W. O aparelho utilizado para medir a intensidade do som foi um decibelímetro digital da marca SHACK, modelo 33-2055. As medidas foram realizadas com a caixa aberta (L_1) e depois vedando o espaço interno com a colocação de um tijolo (de mesmo traço) na parte superior (L_2). O isolamento foi calculado pela diferença de L_1 e L_2 . Foram realizadas três leituras e depois calculadas as médias. Tentou-se efetuar uma comparação de dados deste ensaio com outros tipos de tijolos comerciais (tijolo alveolar e tijolinho comum com paredes duplas) posicionados na horizontal e vertical, de maneira que a espessura da caixa ficasse mais próxima aos tijolos de adobe (10 cm). Todos esses valores estão apresentados na Tabela 02.

Tabela 02- Isolamento acústico dos tijolos de adobe, em função do traço e espessura

Traços	Espessura (cm)	Isolamento – dB ($L_1 - L_2$)
T 0%	10,0	8,7
T 10%	10,0	6,3
T 15%	10,0	6,0
T 20%	10,0	5,7
T 25%	10,0	4,7
T 30%	10,0	4,3
T 40%	10,0	4,3
Tijolo maciço	9,5	2,0
Tijolo Baiano (vertical)	8,6	2,0
Tijolo Baiano (deitado)	18,5	2,7

Comparando-se as colunas 01 e 03 da Tabela 02 nota-se claramente que o aumento de resíduo nos diferentes traços fez reduzir o desempenho do material enquanto isolante acústico. Este fato já estava sendo esperado, pois como constatado nas pesagens dos tijolos houve uma grande perda de massa com o aumento de resíduo, decrescendo de 5,4 Kg do traço 0% até 4,0 Kg para o traço 40%. Segundo a teoria de condutividade acústica o desempenho acústico do material é proporcional a massa do material. Ainda comparando os valores obtidos deste ensaio com resultados dos tijolos baianos (nas duas posições) e os tijolos maciços pode-se dizer que os tijolos de adobe (nos diferentes traços) apresentaram desempenho superior.

2.3. Ensaio de Intemperismo

No ensaio de intemperismo, também chamado de ação climatológica, foram usadas placas menores de 15 x 15 x 2 cm, na mesma composição dos diferentes traços dos tijolos de adobe, e essas foram expostas aos agentes climáticos por um período aproximado de 4 meses, conforme apresentado nas Figura 04. As placas foram colocadas em uma bancada vazada, inclinada com ângulo de 45°, de maneira a acelerar o processo de envelhecimento, sendo instalada em um local aberto, posicionada para a face sul. O ensaio iniciou-se com leituras semanais ao longo de quatro meses, e, com vistorias mensais até a presente data.

No período de realização desse ensaio, foi registrada qualquer modificação nas placas, como por exemplo, o aparecimento de micro fissuras ou fissuras profundas, quebras das placas, desagregação mediana ou total do material.

Nas primeiras três semanas os corpos-de-prova permaneceram intactos aos agentes climáticos. Na quarta semana os corpos-de-prova com maiores porcentagens de resíduos (40%) apresentaram pontos de vazios nas placas (presença de pontos com porosidade) e, também, uma significativa mudança de cor, tornando-se mais esbranquiçados, enquanto que os outros traços permaneceram intactos. O traço não contendo resíduo (0%) destacou-se negativamente, pois já na quarta semana, com os ciclos de calor, frio e chuva, iniciaram-se as alterações, registrando-se a perda de material em dois corpos-de-prova. Após três meses, os corpos-de-prova do referido traço já estavam parcialmente desagregados e, com 4 meses, totalmente desagregados, conforme ilustra a Figura 05. O pior efeito para os corpos-de-prova foi provocado pela umidade, isto é, a desagregação parcial e total ocorreu em dias de intensa chuva e de granizo.

Deste ensaio pode-se concluir que a adição de resíduo, mesmo que em pequena porcentagem, desempenhou um papel fundamental, evitando a desagregação rápida e total das placas como o traço de 0%. Outro aspecto importante está relacionado aos traços elevados de resíduo (40% e 50%), os quais comportaram-se também negativamente, pois já na quarta semana estavam esbranquiçados, e com o passar dos meses ocorreu o aparecimento de micro fissuras e bolores, perdendo assim, a cor marrom característica do adobe.

3. Conclusões parciais

No que se refere a trabalhabilidade, verificou-se que os tijolos somente de terra (solo arenoso) apresentaram maiores dificuldades para serem manuseados, moldados e desmoldados. Os tijolos com a presença de resíduo resultavam em misturas com mais “liga” e retraíam-se menos quando secos, desgrudando-se com maior facilidade das formas, sem quebras ou esfarelamento de suas bordas. Este fato vem sendo comentado por diversos pesquisadores ligados a construções com terra, pois estes estabilizantes naturais, como no caso as fibras vegetais reduzem, significativamente, os efeitos de retrações e, principalmente, fissurações.

Com os resultados obtidos do ensaio de **condutividade térmica**, verificou-se que o aumento de resíduo fez decrescer os valores de condutividade, isto é, o aumento de resíduo nas misturas fez aumentar o isolamento térmico do material. Desta forma, por este ensaio, o traço 40% seria o escolhido com o valor numérico de melhor isolamento térmico.

Do ensaio de **condutividade acústico** observou-se que o aumento de resíduo nos diferentes traços reduziu gradativamente os valores do isolamento acústico. Assim, o desempenho acústico do tijolo foi proporcional a sua massa, com os traços 10%, 15% e 20% apresentando valores de isolamento próximos a 6 dB, sendo então os escolhidos.

No ensaio de **intemperismo** pode ser verificada a característica fundamental do resíduo na mistura: sua durabilidade. Este ensaio, que deveria ter um período de duração de quatro meses, ainda se encontra montado e com a continuidade das leituras (mensais). Nestes meses, apesar de intensa precipitação, verificou-se que nas placas dos traços 20%, 25% e 30% permaneceram praticamente intactas, não mudando suas colorações, apresentando apenas alguns pontos de desgastes (correspondente a perda de solo e não de resíduo), enquanto que as placas do traço 0% já estavam desfeitas no início do segundo mês. Devido ao problema de perda de solo em alguns pontos, sugere-se o seu emprego em ambientes internos ou em paredes externas com posterior aplicação de

reboco (com o próprio barro) ou mesmo o uso de impermeabilizantes, e com manutenções constantes.

Após o estudo das características do lodo residual de celulose e papel (análise química e toxicológica) e a realização de onze ensaios (retração, umidade de equilíbrio ao ar, absorção de água, resistência a compressão simples, gotejamento, intemperismo, flamabilidade e incombustibilidade do material, perda de massa, condutividade térmica e acústica), chegou-se a conclusão de três características fundamentais deste componente em terra-crua (solo e resíduo): a durabilidade, trabalhabilidade e, principalmente o seu trabalho como componente estabilizador (elemento de ligação). Finalizando, por intersecção dos diferentes ensaios escolheu-se o traço de 20% como o de melhor comportamento.

Agradecimentos: À UNESP, pelo afastamento, e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pelo aporte financeiro, que possibilitaram a participação nos eventos.

4. Bibliografia

BATTISTELLE, R. A. G. (2000): “Utilização do resíduo da indústria de papel e celulose na composição de tijolos de adobe”. Projeto de pesquisa para o exame de qualificação de doutorado. São Carlos, CRHEA/EESC/USP.

CINCOTTO, M. A. (1988): “Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil”, In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Tecnologia de edificações*. 1.ed. São Paulo, Construtora Lix da Cunha S.A/ PINI/ IPT, Divisão de Edificações, p. 71-74. (Coletânea de trabalhos).

HOUBEN, H. (1997): “Pour une architecture nouvelle”. *Ecodecision-Environnement e Politiques*, n. 25, p. 27-28.

PORTA-GÁNDARA, M. A., RUBIO, E.; FERNANDEZ, J. L. (2001): “Economic feasibility of passive ambient comfort in Baja Califórnia dwellings”. *Building and Environment*. <http://www.elsevier.com/locat/buildenv> (11 jul. 2002)

MARITONI, C. A. & SOARES, R. S. (1998): “Aspectos energéticos dos resíduos do município de Paulínia”, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 3., São Paulo, 1998. Anais (CD-rom). São Paulo, Ministério das Minas e Energia.

McHENRY JR., P.G. (2000): “Adobe and rammed earth buildings: design and construction Arizona”. <http://www.uapress.arizona.edu/samples/sam306.htm> (02 ago. 2004).

SANTOS, W. N.; CINTRA FILHO, J. S. (1986): “Método de fio quente com ajuste por regressão não linear na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos”. *Revista Cerâmica*, Rio de Janeiro, v. 32, n. 198, p.151-198, jul.

SILVA, M. S. da (2001): “A terra crua como alternativa sustentável para a produção de habitação social”. São Carlos. 167p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

1ª Autora - Profª Dra Rosane Aparecida Gomes Battistelle, vinculada ao Departamento de Engenharia Civil da Unesp/Bauru, graduada em Engenharia Civil/UNESP/Bauru, com mestrado na Escola de Engenharia de São Carlos/EESC/USP/SP em Engenharia de Estruturas e doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental, também na EESC/USP/SP- Brasil.

2º Autor – Prof. Dr. Obede Borges Faria, vinculado ao Departamento de Engenharia Civil da Unesp/Bauru, graduado em Engenharia Civil/UNESP/Bauru, com mestrado em Arquitetura e Urbanismo da EESC/USP/SP e doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental, também na EESC/USP/SP- Brasil.

APROVEITAMENTO DO LODO RESIDUAL DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE E PAPEL EM TIJOLOS DE TERRA CRUA

Battistelle, R. A .G. e Faria, O. B.*

Figuras:



Figura 01- Vista superior do corpo-de-prova, com detalhe da colocação do termopar no meio do tijolo e, a 16 mm acima desse, o fio quente e as garras metálicas que mantêm os fios esticados.

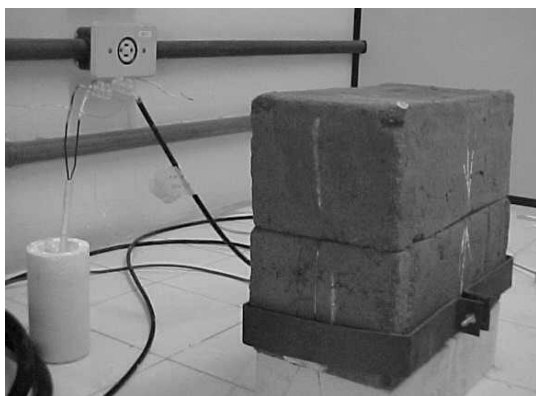


Figura 02- Corpo-de-prova pronto para ser ensaiado, já ligado ao sistema de monitoramento de temperatura e condutividade.



Figura 03- Bancada geral, montada com os diferentes tijolos para o ensaio acústico.



Figura 04- Esquema geral da bancada de envelhecimento do ensaio de intemperismo.



Figura 05- Quatro meses de exposição das placas.